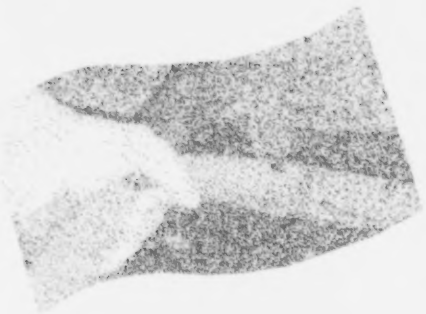
Étude pluridisciplinaire visant à mettre au point un outil expert pour la prédiction du comportement des remblais en pâte

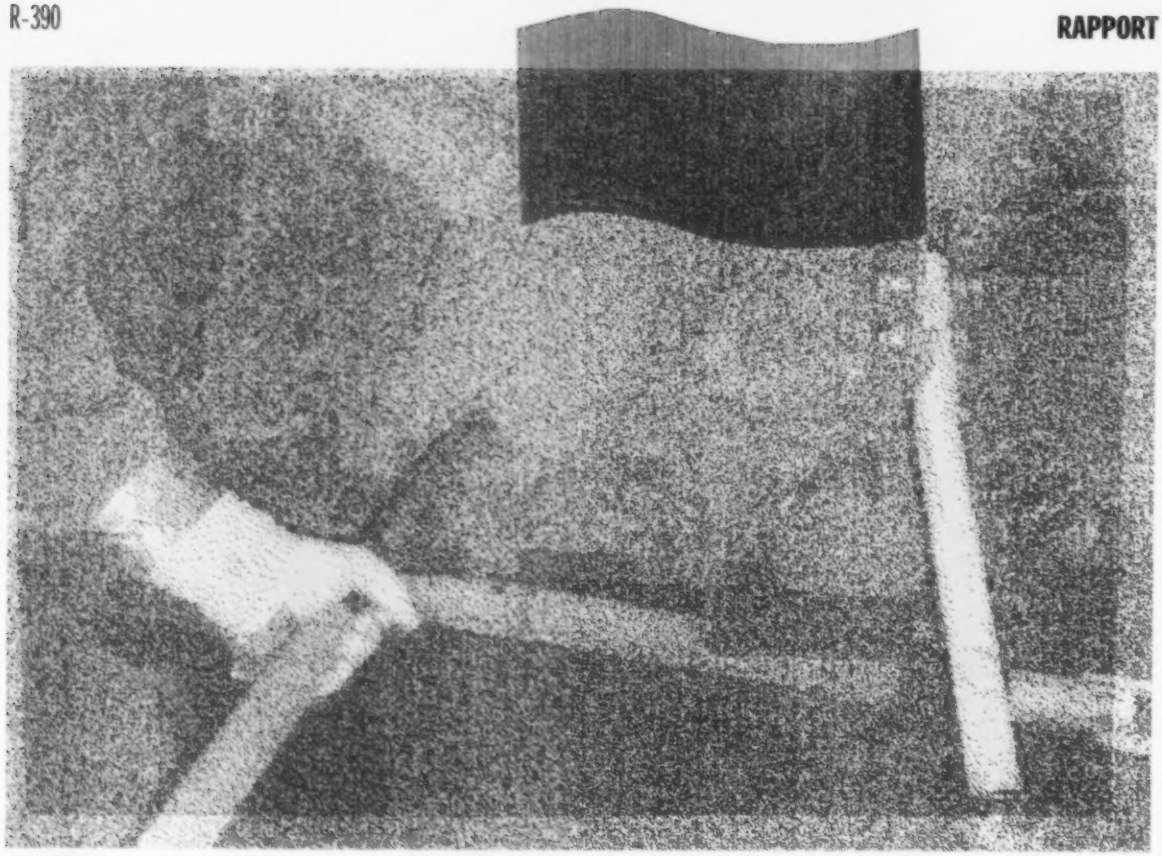


ÉTUDES ET RECHERCHES

Mostafa Benzaazoua
Mamadou Fall
Serge Ouellet

R-390

RAPPORT



irsst

105-06325/

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES
travaillent pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
• Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, décembre 2004

Étude pluridisciplinaire visant à mettre au point un outil expert pour la prédiction du comportement des remblais en pâte

ÉTUDES ET RECHERCHES

Mostafa Benzaazoua, Mamadou Fall et Serge Ouellet
Département des sciences appliquées, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

SOMMAIRE

Ce rapport synthèse traite du développement d'un outil expert d'aide à la prédiction et à l'optimisation des propriétés des remblais miniers cimentés en pâte. Il représente une synthèse des principaux résultats d'un projet financé par l'IRSST et qui s'intitule: «*Étude pluridisciplinaire visant à mettre au point un outil expert pour la prédiction du comportement des remblais miniers en pâte*». En effet, vu la complexité du matériau « remblai en pâte » et les problèmes de sécurité potentiellement inhérents à ce dernier dans les chantiers miniers, il n'existe aujourd'hui aucune méthode réellement satisfaisante pour guider la conception des recettes des remblais en pâte cimentés. Dans cette étude, partant d'études expérimentales, des modèles mathématiques basés sur les techniques de surface réponse ont été développés. Ces derniers permettent de prédire avec une assez bonne précision les principales propriétés des remblais en pâte, à savoir la résistance mécanique, la consistance, le pourcentage de solide et le coût de production du remblai minier cimenté en pâte. Les résultats de la modélisation ont permis une optimisation des propriétés des remblais. Cette dernière tient compte, simultanément, des critères importants pour l'entreprise (rentabilité de la technique des remblais, sécurité des travailleurs et faisabilité). Les modèles développés ont été validés expérimentalement. Ils ont permis la mise au point d'un outil expert préliminaire d'aide à la fabrication des recettes de remblais en pâte. Les résultats de cette étude vise une contribution à la recherche sur les remblais miniers en pâte et à une meilleure maîtrise de l'optimisation des recettes de ces derniers.

TABLE DES MATIÈRES

Page

Sommaire i
1. Introduction 1
2. Méthode et démarche 2
3. Études expérimentales 3
3.1 Objectifs et démarche expérimentale 3
3.2 Matériaux utilisés et préparation des échantillons 4
3.2.1 Matériaux utilisés 4
3.2.2 Préparation des échantillons 5
3.3 Tests expérimentaux 5
3.4 Principaux résultats des études expérimentales 6
3.4.1 Influence des propriétés physiques et chimiques des résidus sur la résistance des remblais en pâte cimentés 6
3.4.2 Influence de la quantité et de la chimie du liant hydraulique sur la résistance du remblai en pâte 8
3.4.3 Influence de la qualité et de la quantité de l'eau de gâchage sur la résistance mécanique du remblai en pâte 9
3.5 Conclusion 10
4. Modélisation des propriétés des remblais en pâte 11
4.1 Introduction 11
4.2 Prédiction de la performance des remblais en pâte non soumis à l'effet de sulfate 11
4.2.1 Développement des modèles 11
4.2.2 Effet des variables sur la réponse des modèles 13
4.2.3 Vérification de la validité des modèles 15
4.3 Conclusion 16
5. Optimisation des recettes de remblais en pâte 16
6. Outil d'aide à la fabrication des remblais miniers en pâte cimentés 17
7. Conclusion 18
8. Références 19
Remerciements 21

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1 : Bornes expérimentales des modèles 12
Tableau 2 : Coefficients de détermination des différents modèles 13
Tableau 3 : Résultats des tests de vérification de la validité des modèles développés pour les remblais non sulfatés 15

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation schématique de la démarche suivie et de la méthode de prédiction des propriétés et d'optimisation des remblais en pâte 2
Figure 2 : Méthodologie de l'étude expérimentale de l'influence des paramètres physiques et chimiques des constituants du remblai sur son comportement mécanique 3
Figure 3 : Courbe de distribution granulométrique de la taille des grains des résidus miniers échantillonnés 4
Figure 4 : Évolution de la résistance du remblai (UCS) en fonction de la granulométrie du résidu de la mine KNA 6
Figure 5 : Influence de la densité du résidu sur la résistance du remblai (résidu de la mine LVT utilisé) 7
Figure 6 : Influence de la densité du résidu sur la consommation (volumique) en liant (teneur massique en ciment 4,5 %) et sur le coût du remblai préparé (résidu de la mine LVT utilisé) 7
Figure 7 : Influence de la teneur en soufre (en pourcentage massique) sur la densité relative du résidu et sur le développement de la résistance mécanique du remblai en fonction du temps de cure 8
Figure 8 : Évolution de l'UCS du remblai de la mine LVT avec le type de ciment et sa proportion dans le temps (FA : *Flys Ash*) 9
Figure 9 : Effet de la concentration en sulfate de l'eau de gâchage sur la résistance mécanique des remblais en pâte à base de Ciment Portland et après 28 jours de cure (résidu de la mine LVT utilisé) 10
Figure 10 : Représentation schématique des objectifs et de l'approche de la modélisation (%S: pourcentage de solide) 11
Figure 11 : Profil de prédiction de la résistance, du *slump*, du coût et du pourcentage de solide du remblai 14
Figure 12 : Courbes iso-résistances (Ln UCS 28 jours in kPa) du remblai en fonction de rapport E/C et du % Fines 15
Figure 13 : Désirabilité globale du remblai en pâte non-sulfaté 17
Figure 14 : Page principale d'entrée des données de l'outil expert développé 18
Figure 15 : Exemple de courbes de prédiction de l'UCS pouvant être livrées par l'outil expert 18

1. INTRODUCTION

L'utilisation du remblai minier cimenté en pâte dans l'industrie minière est devenue une technique très largement pratiquée dans les mines modernes à travers la planète et, particulièrement, au Québec et en Abitibi-Témiscamingue. Le remblai cimenté en pâte est un mélange de résidus miniers fins provenant des concentrateurs, encore humides, issus d'une filtration du résidu final, d'un liant hydraulique composé d'un ou de plusieurs ciments, dans une proportion allant de 3 à 7 % et, enfin, d'eau, pour atteindre la consistance désirée. Le remblai en pâte est préparé dans une usine de remblai située dans la mine, puis transporté par gravité et/ou pompage à travers des trous de forages et/ou des conduites jusqu'à son lieu de dépôt (sous terre pour les remblais souterrains ou, rarement, en surface pour les remblais de surface). Le remblai en pâte souterrain joue un rôle technique important dans les mines souterraines. En effet, il permet d'assurer la stabilité des chantiers et une extraction plus complète des minerais. Le remblai en pâte constitue aussi une technologie novatrice de gestion des résidus miniers (potentiellement polluants ou non). En effet, il peut permettre de stocker sous terre jusqu'à 60 % des résidus miniers potentiellement polluants pour l'environnement.

Toutefois, les avantages reliés à la technologie des remblais en pâte ne seront pleinement réalisés que si l'on a pris soin de caractériser et d'étudier adéquatement les propriétés physico-chimo-mécaniques des remblais en pâte préparés dans l'usine de remblai. En effet, l'ingénierie des mines est confrontée à de nombreux défis technologiques. Ces défis sont généralement d'assurer une rentabilité croissante de la production, tout en garantissant une sécurité maximale sous terre. Cette sécurité dépend, en grande partie, de la stabilité physique ou mécanique de l'ensemble des structures en place et, en particulier, de celle du remblai en pâte. Pour diverses raisons, il peut arriver que le remblai glisse ou s'écroule. Cet effondrement peut entraîner, dans certains cas, la mort des personnes travaillant à proximité de la zone et/ou des dégâts corporels ou matériels importants, sans compter la dilution importante que subit le minerai ainsi que les arrêts de production de la mine. Plusieurs études (Landriault, 1995; Amaratunga & Yaschyshyn, 1997; Archilbald *et al.*, 1998; Hassani et Archibal, 1998; Benzaazoua *et al.*, 2000, 2003b; Belem *et al.*, 2000; Fall *et al.*, 2004; etc.) effectuées au cours des dernières années ont montré que la stabilité des remblais est largement influencée par la qualité du remblai en pâte préparé dans l'usine de remblai, c'est-à-dire que la connaissance, la prédiction et l'optimisation des propriétés des remblais en pâte fabriqués sont indispensables, lorsque l'on veut disposer d'un environnement de travail sécuritaire et d'une mine rentable. Conscients de cette nécessité, plusieurs chercheurs ou équipes de recherche dans le monde entier particulièrement l'équipe de recherche de l'UQAT-URSTM se sont lancés à la recherche d'outils experts ou de méthodes efficaces permettant d'optimiser les remblais en pâte et/ou de prédire leur performance. Jusqu'ici, d'importants résultats ont été obtenus. Cependant, malgré l'importance de ces résultats, ces derniers sont loin d'être suffisants. Ceci est principalement attribuable :

- d'une part, à la complexité du matériau remblai. Il s'agit d'un matériau dont les propriétés sont influencées par plusieurs paramètres d'ordres physique, chimique et/ou technique. Les matériaux entrant dans la fabrication du remblai (résidus miniers, eau de gâchage, liant, etc.) sont très variables, et le remblai lui-même présente des caractéristiques qui varient au cours du temps. Tout ceci fait que le remblai présente un comportement complexe et, jusqu'à maintenant, pas suffisamment connu.

- d'autre part, à un manque d'approche mathématique du problème. La majorité des études (Landriault, 1995; Amaratunga & Yaschyshyn, 1997; Archilbald *et al.*, 1998; Hassani et Archibal, 1998; Benzaazoua *et al.*, 2000, 2003b; etc.) sur l'optimisation des mélanges de remblai en pâte, effectuées jusqu'à présent, ont surtout privilégié l'approche purement expérimentale, qui n'est pas suffisante pour résoudre des problèmes ou comprendre des systèmes aussi complexes. Ces études reposent essentiellement sur l'expérience des experts, et elles ne permettent qu'une évaluation qualitative du comportement des remblais. Cette dernière est aussi, malheureusement, souvent affectée par une grande part de subjectivité.

Donc, si on tient compte des faits évoqués ci-dessus, l'intégration d'une approche mathématique adéquate dans ladite recherche peut permettre d'optimiser les remblais et de prédire leurs propriétés

avec une assez bonne précision, tout en diminuant au minimum la part de subjectivité dans cette analyse. C'est pourquoi, dans la présente étude, des modèles mathématiques, basés sur les techniques de «surfaces réponses», seront développés pour permettre une prédiction des principales propriétés des remblais en pâte et leur optimisation. Ces propriétés sont :

- Leur résistance mécanique; cette dernière permet d'évaluer la stabilité physique des remblais (c'est-à-dire, la sécurité du milieu de travail) par la méthode de Mitchel (1989);
- Leur consistance ou leur taux d'affaissement (*slump*); ce dernier permet de juger la transportabilité des remblais fabriqués;
- Leur pourcentage solide; il sert également à définir la transportabilité du remblai, mais aussi à déterminer la quantité maximale de résidus miniers pouvant être stockée sous terre;
- Leur coût; il dépend en grande partie de la quantité de ciment utilisée.

Ainsi, les objectifs spécifiques de cette étude sont les suivants :

- Étude détaillée des effets des principaux constituants (résidus, soufre, ciment, eau de gâchage, etc.) du remblai en pâte sur sa résistance mécanique;
- Développement de modèles mathématiques pour prédire la qualité (résistance mécanique, consistance, coût, pourcentage de solide) des remblais en pâte;
- Optimisation des recettes des remblais en pâte, en respectant les contraintes techniques, physiques et économiques de l'entreprise minière;
- Et, enfin, développement d'un outil de design simple (progiciel) d'aide à la fabrication des recettes de remblai en pâte.

2. METHODE ET DEMARCHE

Dans cette étude, la méthode des surfaces de réponses a été utilisée pour prédire les propriétés mécaniques (UCS), physiques (affaissement ou *slump*, pourcentage de solide) et économiques des remblais. Celle-ci, combinée avec la fonction de désirabilité, a permis une optimisation des propriétés des remblais. La *figure 1* montre les différentes étapes de cette étude, et elle schématise les principes de modélisation et d'optimisation développés dans le cadre de cette recherche. Alors que les principes fondamentaux des méthodes de surfaces réponses sont décrits d'une manière détaillée dans les travaux de Box & Wilson (1951), Box & Drapper (1987), Khuri & Cornell (1987), Myers & Montgomery (1995), ceux d'optimisation par l'approche de désirabilité sont traités dans les publications de Harrington (1965) et Derringer & Suich (1980).

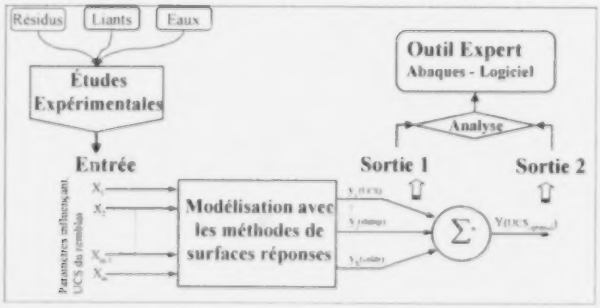


Figure 1 : Représentation schématique de la démarche suivie et de la méthode de prédiction des propriétés et d'optimisation des remblais en pâte

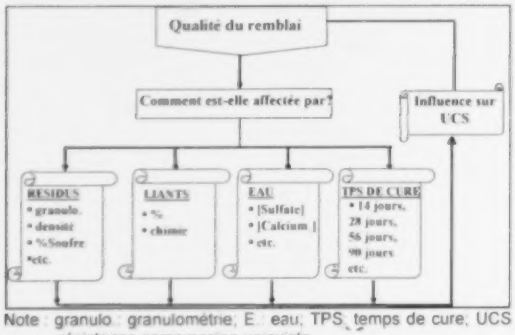
3. ÉTUDES EXPERIMENTALES

3.1 Objectifs et démarche expérimentale

Étant donné que la résistance mécanique est l'un des paramètres les plus importants dans le design des ouvrages de remblai en pâte, c'est-à-dire dans l'évaluation de la stabilité des chantiers miniers remblayés, les études expérimentales réalisées dans le cadre de cette recherche portaient principalement sur l'évaluation de l'influence des principaux composants (résidu, ciment, eau, etc.) du remblai et du facteur temps sur sa résistance mécanique. Ainsi, les principaux objectifs visés dans cette étude peuvent être résumés comme suit (*figure 2*) :

- Étude de l'influence des caractéristiques physiques (granulométrie, densité) et chimiques (teneur en soufre) des résidus miniers sur la résistance mécanique des remblais en pâte;
- Étude de l'influence de la chimie et de la quantité du liant utilisé sur la résistance mécanique du remblai;
- Étude de l'influence de la qualité (teneur en sulfate) et quantité (proportion) de l'eau de gâchage sur la résistance mécanique du remblai en pâte.
- Étude de l'effet du temps de cure et du pourcentage de solide (proportion de solide dans le remblai) sur la résistance mécanique des remblais.

La *figure 2* résume les différentes parties et étapes de cette étude expérimentale. Les résultats des études expérimentales sont décrits en détail dans Benzaazoua *et al.* (2003a,b) et Fall *et al.* (2004a,b).



Note : granulo : granulométrie; E : eau; TPS : temps de cure; UCS : résistance compression uniaxiale

Figure 2 : Méthodologie de l'étude expérimentale de l'influence des paramètres physiques et chimiques des constituants du remblai sur son comportement mécanique

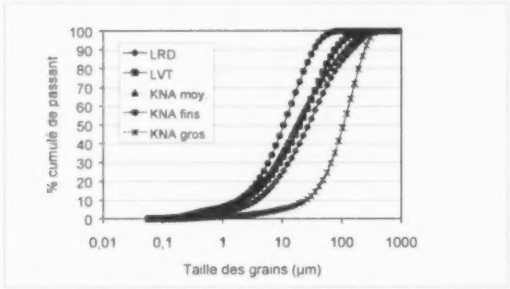
3.2 Matériaux utilisés et préparation des échantillons

3.2.1 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette étude sont des résidus miniers, des liants hydrauliques et des eaux.

a) Les résidus miniers

Trois résidus différents, avec des caractéristiques physiques (granulométrie, densité, etc.) et chimiques différentes (teneurs en sulfures, en sulfate) et provenant de trois mines abitibiennes (mine KNA, mine LRD, mine LVT) ont été échantillonnés. La *figure 3* montre les courbes granulométriques (déterminées par granulométrie au laser Mastersizer de Malvern®) des différents résidus miniers échantillonnés. Les autres caractéristiques physiques et chimiques de ces résidus sont décrites dans Benzaazoua *et al.* (2003) et Fall *et al.* (2004b).



Note : Pour la mine KNA, trois résidus de différentes granulométries (résidus fins, moyens et grossiers) ont été échantillonnés.

Figure 3 : Courbe de distribution granulométrique de la taille des grains des résidus miniers échantillonnés

b) Les liants hydrauliques

Quatre types de liants hydrauliques ont été utilisés comme agents de cimentation du remblai en pâte dans cette étude expérimentale. Ces liants sont :

- Du ciment Portland type 10 (CP10);
- Du ciment Portland type 50 (CP50); le ciment Portland type 50 est plus résistant à l'attaque sulfatique que le CP10;
- Des laitiers de hauts fourneaux (*Slag*);
- Des cendres volantes (*Fly Ash*, FA).

c) Les eaux

Différents types d'eau ont été utilisés pour fabriquer les mélanges de remblai en pâte. Ces eaux, qui sont soit des eaux de procédés des mines (riche en sulfate), soit des eaux provenant des lacs à proximité des mines étudiées (pauvre en sulfate) ou de l'eau de robinet, se différencient principalement par leur qualité chimique, c'est-à-dire par leur teneur en sulfate. Les analyses de la composition chimique par ICP ES de ces eaux sont publiées dans Benzaazoua *et al.* (2003).

3.2.2 Préparation des échantillons

Afin d'étudier l'influence des principaux constituants du remblai et d'autres facteurs (temps, pourcentage solide, etc.) sur la résistance mécanique du remblai, une préparation préalable des échantillons a été nécessaire. Afin d'étudier l'effet de la granulométrie du résidu sur la résistance du remblai, les résidus miniers échantillonnées ont été séparés par hydrocyclone ou tamissage, pour obtenir des échantillons de résidus appartenant à différentes classes granulométriques (fine à grossière, d'après la classification de Landriault, 1997). Étant donné que la densité des résidus est étroitement liée à la proportion de soufre présente dans le résidu (Benzaazoua *et al*, 2003a; Fall et Benzaazoua, 2003c), la technique de désulfuration (McLaughin et Stuparyk, 1994; Stuparyk *et al.*, 1994; Leppinen *et al.*, 1997; Benzaazoua *et al.*, 2000; etc.) a été utilisée pour créer à partir d'un résidu échantillonné des résidus ayant différentes teneurs en sulfure, c'est-à-dire différentes densités. Le lavage de ces résidus avec l'eau douce a permis d'éliminer le sulfate initial présent dans ces derniers. Les résidus préparés ont ensuite été utilisés pour étudier l'effet de la densité et de la teneur en sulfure sur la résistance des remblais. Afin de pouvoir étudier l'effet de la qualité (teneur en sulfate) de l'eau de gâchage sur la résistance des remblais, des eaux ayant différentes teneurs en sulfate ont été préparées. Cette préparation s'est faite en mélangeant soit l'eau de robinet avec de l'eau de procédé, ou en ajoutant du concentré de sulfate à l'eau de robinet. D'autres détails sur la préparation des échantillons sont publiés dans Benzaazoua *et al.* (2003, 2004) et Fall *et al.* (2004a, b).

Après la phase de préparation des matériaux entrant dans la fabrication des remblais en pâte, les mélanges de remblai proprement dits ont été préparés. Pour fabriquer ces mélanges au laboratoire, du résidu minier, du liant hydraulique et de l'eau de mélange sont malaxés ensemble (pendant environ 7 min) jusqu'à obtenir une pâte homogène d'une consistance donnée. Cette consistance est mesurée à l'aide du test d'affaissement au cône d'Abrahms (ASTM C 143-90). Le remblai en pâte ainsi obtenu est ensuite coulé dans des moules cylindriques en plastique. Ces moules capés présentent une hauteur moyenne de 200 mm et un diamètre moyen de 100 mm. Les cylindres de remblai ainsi fabriqués sont ensuite stockés dans une chambre humide maintenue à une humidité relative moyenne de 70 % et à une température moyenne de 21°C, ceci afin de se rapprocher des conditions régnant dans les chantiers miniers souterrains canadiens.

3.3 Tests expérimentaux

Afin d'évaluer la résistance mécanique, la consistance, le coût et le pourcentage de solides des remblais en pâte préparés, les propriétés suivantes ont été déterminées respectivement sur chaque échantillon de remblai :

- La résistance mécanique à la compression uniaxiale (UCS) après un temps de cure de 14, 28, 56, 90 et 120 jours. Ces essais ont été effectués d'après les normes ASTM C 39;
- Le coût de chaque échantillon de remblai. Cette détermination du coût a été basée sur l'évaluation du coût de la quantité de ciment ou de liant hydraulique utilisée. Les prix des ciments sur le marché canadien en 2000 ont été considérés;
- La consistance du remblai. Celle-ci a été mesurée en effectuant des tests d'affaissement au cône d'Abrahms sur les mélanges frais de remblai en se basant sur les normes ASTM C 143-90;
- Le pourcentage ou la concentration de solide (en %). Ce dernier définit le rapport du poids massique de solide (résidu et ciment) dans un mélange au poids massique total du mélange total (eau et solide).

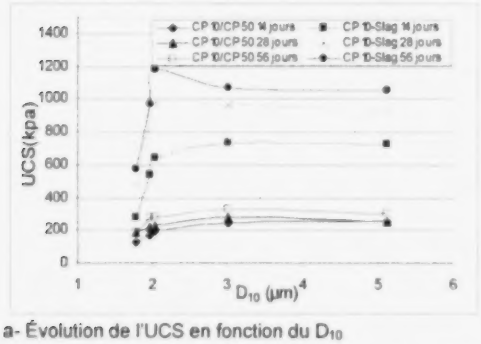
3.4 Principaux résultats des études expérimentales

3.4.1 Influence des propriétés physiques et chimiques des résidus sur la résistance mécanique des remblais en pâte cimentés

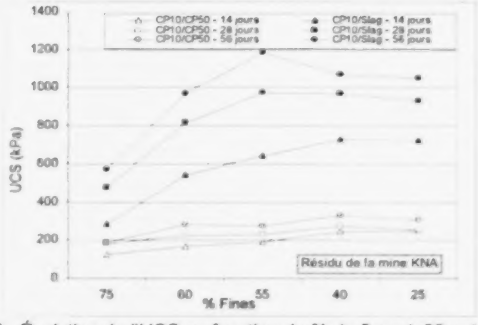
a) Influence de la granulométrie sur la résistance mécanique des remblais en pâte

Afin d'étudier l'influence de la granulométrie du résidu sur la résistance mécanique des remblais en pâte, une centaine de cylindres de remblais en pâte, renfermant des résidus miniers présentant différentes granulométries, ont été préparés. Les liants hydrauliques utilisés pour ces mélanges de remblais sont constitués par un mélange de CP10 et CP50 dans un rapport (massique) de 50/50 ou par un mélange de CP10 et de laitier (*Slag*) dans un rapport de 20/80. Les détails des différents mélanges fabriqués sont publiés dans Benzaazoua *et al.* (2003) et Fall *et al.* (2004b).

Les résultats de cette étude détaillée de l'effet de la taille des grains des résidus miniers sur la résistance mécanique des remblais ont montré que la granulométrie du résidu minier de départ joue un rôle essentiel sur la résistance mécanique des remblais cimentés, en particulier sur le degré de consolidation des remblais. La *figure 4* met en évidence l'effet de la taille des grains du résidu minier sur la résistance mécanique des remblais en pâte. Le remblai cimenté présente une résistance optimale pour des valeurs de D_{10}, D_{50} et D_{90} comprises respectivement entre 2 et 3 µm, 12 et 32 µm et 115 et 190 µm (*figure 4a*). La proportion de particules fines du résidu initial (taille inférieure à 20 µm) influence considérablement la résistance du remblai en pâte. Les remblais fabriqués avec des résidus grossiers (moins de 35 % de particules fines < 20 µm) à moyen (35 à 60 % de particules fines) offrent de plus grande résistance (*figure 4b*). Des résultats plus détaillés de l'effet de la granulométrie du résidu sur la résistance et/ou la qualité du remblai en pâte sont présentés dans les publications suivantes : Benzaazoua *et al.* (2003, 2004); Fall *et al.* (2004a, b).



a- Évolution de l'UCS en fonction du D_{10}



b- Évolution de l'UCS en fonction du % de fines (<20µm)

Figure 4 : Évolution de la résistance du remblai (UCS) en fonction de la granulométrie du résidu de la mine KNA

b) Influence de la densité relative du résidu sur la résistance mécanique des remblais en pâte

Une quarantaine de cylindres de remblais en pâte qui ne se différencient que par la densité de leurs résidus (c'est-à-dire par le pourcentage de sulfures) ont été préparés en utilisant soit le mélange de liant CP10/CP50 (50/50), ou le mélange de liant CP10/*Slag* (20/80) dans une proportion massique de 4,5 % (Benzaazoua *et al.*, 2003; Fall *et al.*, 2004b). La *figure 5* résume les résultats de l'étude de l'effet de la densité sur la résistance du remblai. La densité du résidu utilisé affecte la résistance du remblai en pâte (*figure 5*). Une augmentation de la densité (à partir de 3,2 g/cm³) se traduit généralement par une

augmentation de la résistance mécanique du remblai. Ceci est attribuable au fait qu'une densité plus élevée se traduit aussi par une consommation volumique en liant plus élevée, c'est-à-dire par un coût de fabrication du remblai en pâte plus élevé (*figure 6*).

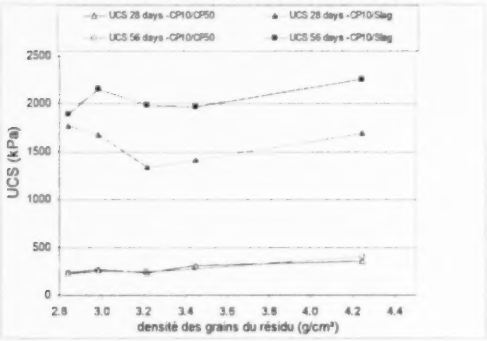


Figure 5 : Influence de la densité du résidu sur la résistance c blai (résidu de la mine LVT utilisé)

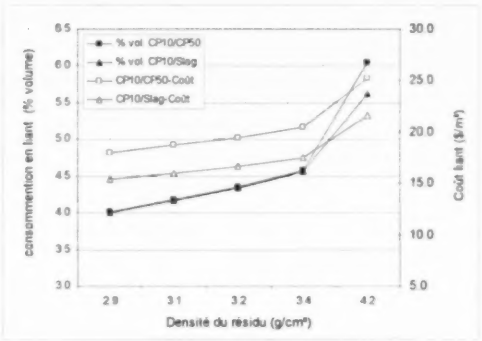


Figure 6 : Influence de la densité du résidu sur la consommation (volumique) en liant (teneur massique en ciment 4,5 %) et sur le coût du remblai préparé (résidu de la mine LVT utilisé)

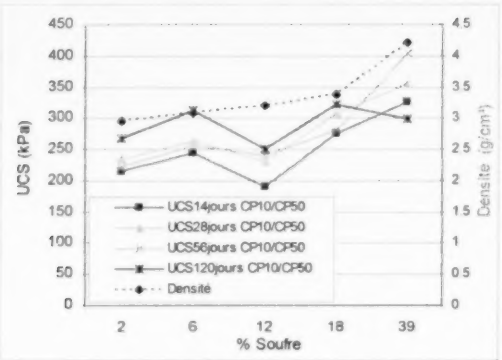
c) Influence de la teneur en soufre du résidu sur la résistance mécanique des remblais en pâte

L'effet de la variation de la teneur en sulfure sur la résistance mécanique a été évaluée sur une quarantaine de cylindres (les mêmes que dans la section précédente) de remblai en pâte dont les résidus présentent différentes teneurs en sulfure (en % massique). En résumé, les résultats de cette étude (publiés dans Benzaazoua *et al.*, 2003, 2004; Fall *et al.*, 2004b) ont montré que le soufre agit d'une manière physique et chimique sur la résistance du remblai.

Sur le plan physique, l'augmentation de la teneur en sulfure du résidu entraîne une augmentation de la densité du résidu (*figure 7*). Cette augmentation se traduit par un changement de la résistance mécanique du remblai (*figure 5*). Des résultats plus détaillés de la relation existant entre la densité relative des résidus et la teneur en soufres sont publiés dans Benzaazoua *et al.* (2003) et Fall *et al.* (2004a,b).

Sur le plan chimique, la présence de sulfure dans le résidu conduit à une production de sulfate. Ce dernier provient de l'oxydation des sulfures dans le résidu et le remblai. Cependant, cette oxydation dans le remblai n'est qu'initiale, à cause de la faible diffusivité de l'oxygène dans des matériaux saturés comme le remblai en pâte. Ceci a été confirmé par des tests de consommation d'oxygène réalisés sur des échantillons de remblais présentant différentes teneurs en sulfures en utilisant la méthode de Elberling *et al.* (1994) et Elberling et Nicholson (1996). La procédure expérimentale et les résultats des tests réalisés dans le cadre de cette recherche sont publiés dans Benzaazoua *et al.* (2003) et Ouellet *et al.* (2003). La *figure 7* met en relief l'évolution de la résistance mécanique du remblai dans le temps en fonction de la teneur en soufre du résidu. Le sulfate issu de l'oxydation des sulfures entraîne la précipitation de minéraux sulfatés pendant l'hydratation du ciment. Ces derniers participent d'abord à la cimentation des pores du remblai, ce qui conduit à une amélioration de la résistance mécanique du remblai. Avec l'augmentation de la teneur en sulfate et, par conséquent, de la quantité de minéraux sulfatés précipités, les pressions intergranulaires développées par ces derniers conduisent à la dégradation de la résistance mécanique dans le temps, tel que montré par la *figure 7*. Cette figure montre, après un temps cure de 120 jours, qu'il se produit une chute de la résistance mécanique des remblais fabriqués avec des résidus riches en sulfures (39 % dans la *figure 7*). Cette chute est attribuable

à l'attaque sulfatique de la matrice cimentaire (Benzaazoua *et al.*, 1999; Benzaazoua *et al.*, 2004; Fall et Benzaazoua, 2004; Fall *et al.*, 2004b)

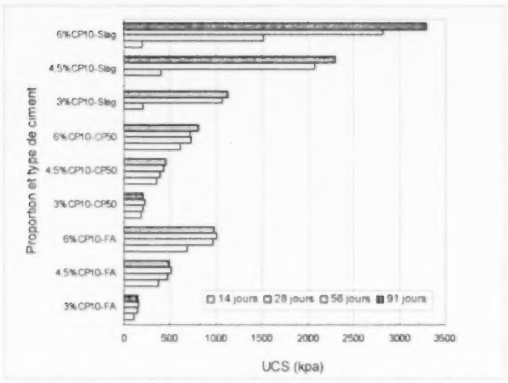


Note Liant utilisé CP10/CP50 dans le rapport 50/50; résidu de la mine LVT utilisé

Figure 7 : Influence de la teneur en soufre (en pourcentage massique) sur la densité relative du résidu et sur le développement de la résistance mécanique du remblai en fonction du temps de cure

3.4.2 Influence de la quantité et de la chimie du liant hydraulique sur la résistance du remblai en pâte

Afin d'étudier l'influence de la chimie (du type) et de la quantité de liant sur la résistance mécanique des remblais, des échantillons de remblais en pâte ont été préparés avec des résidus miniers et des eaux présentant les mêmes caractéristiques physiques et chimiques, mais avec différents types et proportions de liant. Les principaux résultats de cette étude sont résumés à la *figure 8*. Ils ont d'ailleurs confirmé les principales conclusions de Benzaazoua *et al.* (2002), c'est-à-dire qu'une augmentation de la proportion de liant conduit à une amélioration de la résistance du remblai. La chimie du liant a un effet significatif sur la résistance du remblai. Le liant CP10/CP50 est plus approprié pour les remblais très sulfatés. Ceci est causé par la formation d'hydrates sulfatés, qui participent de façon significative à la cimentation. Par conséquent, le liant CP10/CP50 sera utilisé (dans la modélisation) pour les résidus très sulfureux ou riches en sulfate, alors que les laitiers haut fourneau (*Slag*) et CP10/*Slag* sont des liants très appropriés pour les remblais moyennement à peu sulfatés (Benzaazoua *et al*, 2000). Ceci est attribuable au fait que les ciments à ajouts de minéraux confèrent aux réactions d'hydratation habituelles du ciment une hydratation dite de type pouzzolanique. L'effet pouzzolanique conduit à la formation de plus d'hydrates silico-calciques, comme les C-S-H, à la place des phases calciques, reconnue pour sa vulnérabilité dans les milieux agressifs (en présence de sulfate, par exemple). Il est aussi important de mentionner que la plupart des ajouts de minéraux n'ont pas de capacité d'auto-cimentation, et qu'ils ont besoin d'être activés par un autre réactif hydraulique (ciment portland en général) pour qu'ils puissent se comporter comme des agents liants capables d'être utilisés dans les remblais cimentés. Par conséquent, dans la modélisation des propriétés des remblais en pâte fabriqués à partir de résidus peu sulfureux (LVT), le ciment CP10/*Slag* sera utilisé. Le liant CP10/FA (CP10/*Fly Ash*), même s'il est intéressant pour son coût relativement bas, présente des performances plus faibles que le liant CP10/*Slag*. Pour un même pourcentage de liant, les résistances développées par le liant CP10/FA sont toujours inférieures à celles acquises par le liant CP10/*Slag* (*figure 8*).

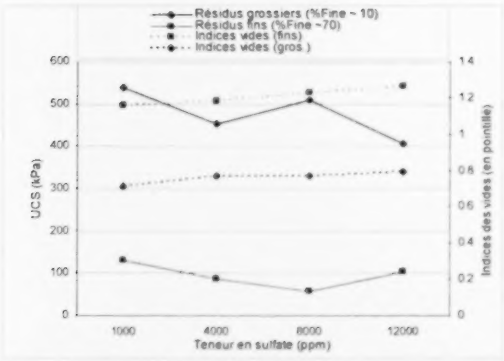


Note : Données de laboratoire tirées de Benzaazoua *et al.* (2000)

Figure 8 : Évolution de l'UCS du remblai de la mine LVT avec le type de ciment et sa proportion dans le temps (FA : *Flys Ash*)

3.4.3 Influence de la qualité et de la quantité de l'eau de gâchage sur la résistance mécanique du remblai en pâte

L'étude de l'effet de la composition chimique de l'eau de gâchage sur l'hydratation des différents types de liant et sur la résistance mécanique du remblai en pâte a montré que la chimie de l'eau de gâchage (particulièrement sa teneur en sulfate), influence la résistance mécanique des remblais. Ceci est montré par la *figure 9*. Cette dernière présente la variation de la résistance (UCS) en fonction de l'augmentation de la concentration totale en sulfate du remblai après 28 jours de cure. Elle montre également l'importance de l'indice des vides (espace intergranulaire) dans le développement de la résistance d'un remblai soumis à une «attaque sulfatique». Cette influence peut être positive (contribution à la cimentation des pores du remblai) ou négative (inhibition des réactions d'hydratation du ciment, détérioration de la cohésion remblai) (Benzaazoua *et al.*, 2004; Fall et Benzaazoua, 2004; Fall *et al.*, 2004b). En effet, quand les sulfates se forment dans une matrice où l'indice des vides est assez grand par rapport à la quantité de sulfate présente dans le remblai, les sulfates participeraient à la cimentation. Cette dernière se traduit par une augmentation de la cohésion du remblai et, par conséquent, de sa résistance mécanique. Cependant, quand l'indice des vides est faible par rapport à la quantité de sulfate présente dans le remblai, la précipitation des sulfates s'accompagne d'une dissipation d'énormes pressions intergranulaires, provoquant la fracturation de la masse de remblai durci dans le temps. Ces pressions sont causées par la précipitation de minéraux gonflants (gypse, ettringite secondaire, etc.) Donc, une bonne optimisation de la granulométrie (indice des vides optimal) contribuerait à atténuer ou à éliminer les effets négatifs du sulfate. Les sulfates peuvent aussi inhiber l'acquisition de résistance du remblai.



NB : %Fine~10 : 10 % particules fines < 20 µm

Figure 9 : Effet de la concentration en sulfate de l'eau de gâchage sur la résistance mécanique des remblais en pâte à base de Ciment Portland et après 28 jours de cure (résidu de la mine LVT utilisé)

3.5 Conclusion

Le but de ce chapitre était d'étudier l'influence de la variation des principaux paramètres physiques et chimiques des matériaux composant le remblai ainsi que des facteurs tels que le temps de cure et le pourcentage de solide sur la résistance du remblai en pâte. Ceci permettra de définir, sans ambiguïté, les bornes des modèles mathématiques à développer dans le chapitre suivant. Afin d'atteindre cet objectif, une étude expérimentale de laboratoire, visant à mettre en évidence la contribution de ces différents paramètres sur l'acquisition de la résistance mécanique des remblais en pâte, a été effectuée. En résumé, les résultats de cette étude expérimentale, présentés dans les paragraphes précédents et dans Benzaazoua *et al.* (2003, 2004), Fall & Benzaazoua (2003) et Fall *et al.* (2004a,b) nous ont permis de conclure qu'au moins dix paramètres ont une influence significative sur la résistance mécanique du remblai. Ces paramètres sont :

- La granulométrie (1), la densité (2), la teneur en soufre (3) du résidu utilisé dans le mélange de remblai;
- Le type (4) et la quantité (5) d'agent liant servant à la cimentation de la pâte de remblai;
- La quantité (6) et la qualité (7) de l'eau de malaxage (teneur en sulfate);
- Le temps (8) de cure (14, 28, 56, 90, 120 jours);
- Le *slump* (9) et le pourcentage de solide (10).

Donc, le remblai est soumis à un ensemble de facteurs dont les variations ont un impact sur sa qualité et sa résistance dans le temps. Vu le nombre de facteurs impliqués et leurs interrelations, toute optimisation de la qualité ou résistance d'un remblai quelconque, par une approche basée sur des études purement expérimentales, serait irréaliste sur le plan financier et technique, car la quantité d'essais à compléter serait beaucoup trop élevée! En effet, étudier l'influence des dix paramètres cités ci-dessus, par l'approche classique, c'est-à-dire basée sur un plan factoriel, par exemple un plan 10 x 5 (10 : nombre de paramètres; 5 : niveaux étudiés pour chaque paramètre), le nombre d'essais à effectuer pour chaque temps de cure choisi serait de 10^5 (100 000). Étant donné qu'un essai de résistance uniaxiale (essai UCS) est relativement cher, le coût total de tous les essais nécessaires serait trop élevé. Ce simple exemple montre le caractère impératif de développer une méthode efficace, basée sur la modélisation, permettant de prédire la résistance mécanique et d'optimiser le mélange des remblais en pâte. Ceci est l'objet du chapitre qui suit.

4. MODELISATION DES PROPRIETES DES REMBLAIS EN PATE

4.1 Introduction

Le remblai fabriqué dans l'usine doit satisfaire aux critères de sécurité (résistance mécanique satisfaisante), techniques (transportabilité, *slump* compris entre 15 et 25 cm; pourcentage de solide compris entre 70 à 85 %) et économiques (rentabilité). C'est pourquoi, dans cette étude, des modèles permettant de prédire la résistance du remblai (UCS), son *slump*, son pourcentage de solide et son coût (basé sur la quantité de ciment utilisée; le ciment peut représenter jusqu'à 75 % du coût de production des remblais en pâte; Grice, 1998) ont été développés. La *figure 10* schématise les objectifs et la démarche de la modélisation. Cette dernière est basée sur la technique de surface réponse (Box et Wilson, 1951; Box et Drapper, 1987; Khuri et Cornell, 1987; Myers et Montomery, 1995).

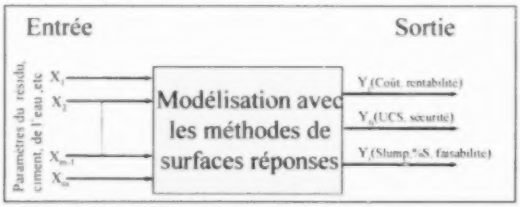


Figure 10 : Représentation schématique des objectifs et de l'approche de la modélisation (%S: pourcentage de solide)

Ainsi, dans cette étude, trois catégories de modèles ont été développées, à savoir :

- Des modèles permettant de prédire l'influence du sulfate sur la performance (c'est-à-dire, les propriétés) des remblais en pâte;
- Des modèles de prédiction de la performance des remblais en pâte non soumis à l'effet du sulfate;
- Des modèles de prédiction de la performance des remblais en pâte riches en sulfate.

Dans ce rapport synthèse, les principaux résultats de la prédiction de la performance des remblais en pâte non soumis à l'effet du sulfate sont présentés. Les résultats plus détaillés ou des autres modèles développés sont présentés dans Benzaazoua *et al.* (2003) et Fall et Benzaazoua (2003b, c, d).

4.2 Prédiction de la performance des remblais en pâte non soumis à l'effet du sulfate

4.2.1 Développement des modèles

Quatre modèles différents ont été développés. Ces derniers permettent :

- De prédire l'UCS du remblai à différents temps de cure;
- De prédire le coût de la quantité de ciment utilisée;
- De prédire le *slump* (la consistance) du remblai produit;
- De prédire le pourcentage de solide du remblai préparé;
- D'évaluer l'influence des constituants des remblais non sulfatés sur la performance de ces derniers

Les quatre paramètres de base utilisés dans le développement de ces modèles sont : la proportion de ciment (%ciment, X_1), le rapport E/C (poids de l'eau/poids du ciment, X_2), la proportion de fines particules (<20µm) présentes dans le résidu minier (%Fine, X_3) et la densité du résidu minier utilisé (Dr., X_4). Ces paramètres (%Ciment, E/C, F/G, Dr.,) tiennent compte respectivement du type et de la quantité de liant utilisés, de la quantité d'eau et des caractéristiques physiques du résidu. Les propriétés chimiques du résidu et de l'eau, à savoir la teneur en sulfate, ont été maintenues fixes. Le ciment utilisé est CP10/*Slag* dans un rapport de 20/80. Ce mélange de ciment est largement utilisé dans l'industrie minière québécoise. Les résidus miniers utilisés sont ceux des mines LRD, KNA et LVT. Pour disposer d'un résidu pauvre en sulfate (élimination de l'effet du sulfate), le lavage des sulfates contenus dans les résidus a été nécessaire.

Après la détermination des principaux paramètres de base des modèles à développer, un plan expérimental a été mis en œuvre. À partir de ces quatre variables (X_1, X_2, X_3, X_4), un plan expérimental de type central composite orthogonal et rotatable (Box et Drapper, 1987; Myers et Montgomery, 1995) a été construit. Cinq niveaux de variables ont été utilisés dans la conception du plan expérimental. Basé sur les résultats de l'étude expérimentale, présentés dans les paragraphes précédents et dans Benzaazoua *et al.* (2003), Fall et Benzaazoua (2003b) ainsi que Fall *et al.* (2004b), et sur des raisons économiques (coût du ciment), les bornes de ces quatre variables ont été fixées, comme donné dans le *tableau 1*. En effet, une proportion de ciment supérieure à 7 % n'est pas économiquement viable pour l'industrie minière au Canada.

Tableau 1 : Bornes expérimentales des modèles

	Codes x_i	-2	-1	0	1	2
Variables (X_i)						
% ciment	X_1	0.8	2.8	4.8	6.8	8.8
E/C	X_2	6.2	7.0	7.8	8.5	9.3
% Fine (F)	X_3	10	30	50	70	90
D_r (g/cm³)	X_4	*	3.38	3.44	3.5	*

* Valeurs absolues considérées donnent des valeurs relatives (codes) supérieures à -2 ou inférieures à 2; ceci est principalement attribuable à la difficulté technique d'obtenir par désulfuration des résidus miniers ayant à la fois une densité et une granulométrie bien donnée.

Les réponses étudiées dans le plan expérimental sont : la résistance mécanique des remblais, leur consistance (*slump*), leur pourcentage de solide et leur coût. Les valeurs expérimentales des réponses étudiées ont été obtenues grâce à l'exécution de tests de laboratoire. Les valeurs absolues considérées dans le plan d'essais représentent généralement une moyenne de deux à trois valeurs expérimentales. Les détails du plan expérimental construit et les résultats des tests effectués en laboratoire sont publiés dans Benzaazoua *et al.* (2003).

Suite à la construction du plan d'essais, des modèles quadratiques de réponses surfaces ont été développés. Le polynôme de second degré (*équation 1*) a été utilisé pour développer des modèles permettant de prédire la résistance mécanique à 28 jours de cure (UCS 28 jours), la consistance (*slump*), le coût (coût) et le pourcentage de solide (% *solid*) des remblais en pâte préparés. Étant donné que la résistance, la consistance et le coût du remblai varient dans un large intervalle pour les conditions considérées dans cette étude, une transformation de ces réponses en logarithme (in UCS 28 jours, in *slump*, in coût) a été nécessaire, ceci afin de réduire au minimum le manque d'ajustement des modèles.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i<j}^{k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad (1)$$

où : β_0 représente l'intercepte, β_i les coefficients de régression pour les termes linéaires, β_{ii} les coefficients de régression pour les termes totalement quadratiques et β_{ij} les coefficients de régression des termes soulignant l'interaction. Les variables x_i représentent les valeurs normalisées (ou codées) de chacune des variables qui influencent la réponse du système. Cette normalisation ou codification permet

d'accroître la précision des modèles à développer, de simplifier les procédures de calcul et de réduire le temps de calcul des ordinateurs.

L'équation 1 a été utilisée pour ajuster les données du plan expérimental. Toutes les données ont été ensuite analysées avec un logiciel standard de statistique. L'utilisation de la méthode des moindres carrés a permis l'estimation des coefficients pour chacune des réponses étudiées. Des *tests* ont été effectués pour identifier les coefficients de régression (β) à inclure dans les équations développées. Ainsi, les coefficients de régression pour les termes totalement quadratiques et ceux des termes soulignant l'interaction se situant au-dessous de 95 % de niveau de confiance ont été éliminés des modèles par régression itérative. Ceci a permis de développer quatre modèles de prédiction (in UCS 28 jours, in *slump*, in coût, % *solid*). Une analyse de *lack-of-fit* a été ensuite effectuée pour tester la capacité des modèles à représenter les données expérimentales.

Les résultats des analyses statistiques sont présentés dans Benzaazoua *et al.* (2003) et dans Fall et Benzaazoua (2003b,c,d). Le *tableau 2* montre les coefficients de détermination des différents modèles. Ces coefficients sont très élevés. Ils sont en moyenne de 0,98. Ceci signifie que plus de 98 % des variations de l'UCS, de la consistance (*slump*), du pourcentage de solide ou du coût du remblai sont causées par la variation des variables CP10/*Slag*, E/C, % Fine et Dr. Ces dernières représentent donc les paramètres qui contrôlent la résistance, le *slump*, le pourcentage de solide et le prix d'un remblai non soumis à l'effet sulfatique. Les résultats des analyses statistiques ont aussi montré une absence de *lack of fit* dans les modèles développés (Fall & Benzaazoua, 2003b,c,d). Ces derniers ont été ainsi utilisés pour simuler l'influence des variables des modèles sur la performance des remblais. Les principaux résultats de simulation sont présentés dans le paragraphe suivant.

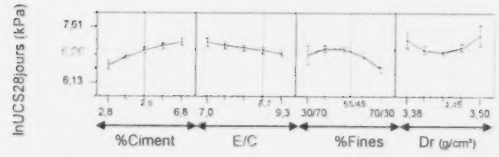
Tableau 2 : Coefficients de détermination des différents modèles

Source	Ln UCS 28 jours	Ln *slump*	% *solid*	Ln coût
R^2	0,97	0,97	0,99	0,99
R^2 ajusté	0,95	0,96	0,99	0,99

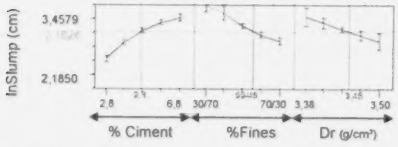
Note : R2 ajusté : coefficient de détermination ajusté.

4.2.2 Effet des variables sur la réponse des modèles

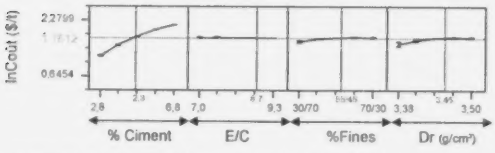
Les *figures 11* et *12* montrent les principaux résultats de simulation de l'effet des paramètres des modèles sur la réponse de ces derniers. La *figure 11* représente les profils de prédiction des propriétés des remblais non sulfatés. Cette figure montre que les résultats de la modélisation sont en parfaite concordance avec les résultats expérimentaux. En effet, comme prévu, une augmentation de la quantité du ciment entraîne une augmentation de la résistance, du *slump et* du coût ainsi qu'une diminution du pourcentage de solide du remblai. Par contre, une diminution du rapport E/C donne au remblai des résistances plus élevées (*figures 11* et *12*). Des résidus plus grossiers donnent aux remblais des résistances plus élevées (*figures 11* et *12*). Ceci est en parfait accord avec les études expérimentales de l'effet de la granulométrie sur la résistance du remblai. Par conséquent, des proportions de particules fines inférieures à 50 % donnent au remblai fabriqué avec du liant CP10/*Slag* (20/80) les résistances les plus élevées pour une proportion de ciment donnée. Mais l'effet de cette granulométrie est largement influencé par la densité du résidu. La *figure 11* (*figure 11b*) montre aussi que le *slump* augmente avec la granulométrie du résidu, mais qu'il diminue pour des densités de plus en plus élevées. Le coût du remblai est quasiment contrôlé par la proportion du ciment (*figure 11c*). Mais des densités élevées entraînent une consommation en ciment plus forte, de même qu'une granulométrie très grossière du résidu diminue la consommation en ciment du remblai et, par conséquent, entraîne une diminution du coût du ciment. Une diminution de la valeur de E/C se traduit automatiquement par une croissance du pourcentage de solide du remblai (*figure 11d*). En conclusion, nous pouvons affirmer que les résultats de la modélisation sont en accord avec ceux de l'étude expérimentale.



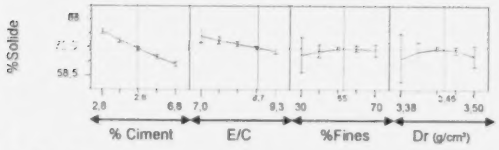
a) Profil de prédiction de la résistance du remblai à 28 jours



b) Profil de prédiction du *slump* du remblai

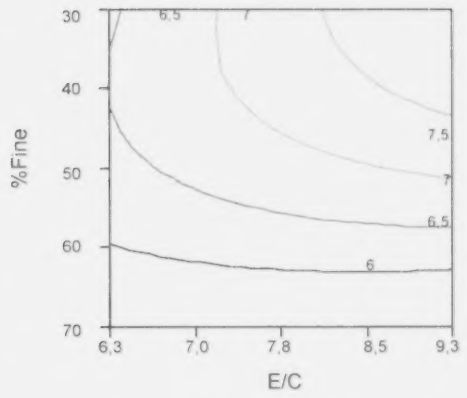


c) Profil de prédiction du coût du remblai



d) Profil de prédiction du pourcentage de solide du remblai

Figure 11 : Profil de prédiction de la résistance, du *slump*, du coût et du pourcentage de solide du remblai



Note : % ciment : 2,8; Dr. : 3,47

Figure 12 : Courbes iso-résistances (Ln UCS 28 jours in kPa) du remblai en fonction de rapport E/C et du % Fines

4.2.3 Vérification de la validité des modèles

Des tests expérimentaux ont été effectués pour vérifier la validité des modèles développés. Quelques résultats de la vérification expérimentale sont donnés au *tableau 3*. Ce tableau met en relief que les modèles développés permettent une assez bonne prédiction de la résistance du remblai, de son *slump*, aussi, une bonne prédiction du coût et du pourcentage de solide du remblai.

Tableau 3 : Résultats des tests de vérification de la validité des modèles développés pour les remblais non sulfatés

	CIM. (%)	E/C	% FINES	DR.	VAL. EXP.	VAL. PRED.	ERR. (%)
UCS 28 jours (kPa)	2,8	8,5	35	3,49	1108	1033	6,7
	2,8	10	65	3,49	1207	1240	2,8
	2,8	8,5	65	3,43	460	521	13,2
	6,8	10	65	3,43	602	627	4,2
	4,8	9,3	24	3,50	1229	1184	3,6
Slump (cm)	4,5	8,4	61	3,43	17,8	21,1	19,0
	4,5	6,4	33	3,50	17,8	18,8	5,6
	6,8	8,5	35	3,50	30,0	27,7	7,7
	2,8	8,5	65	3,43	10,2	10,7	5,0
	4,8	10,6	50	3,45	29,5	28,7	2,7
Coût ($/t)	2,8	8,5	35	3,50	3,51	3,49	0,6
	6,8	8,5	35	3,50	8,21	8,25	0,5
	2,8	8,5	65	3,43	3,51	3,54	0,7
	6,8	10	65	3,43	8,21	8,22	0,1
	4,8	9,3	50	3,45	5,91	5,97	1,0
%Solid	2,8	8,5	35	3,501	81,2	82	1,0
	6,8	8,5	65	3,43	65	65,1	0,1
	2,8	10	65	3,43	78,6	78	0,8
	2,8	8,5	65	3,43	81,2	82,6	1,7
	4,8	9,3	24	3,50	70,2	70,9	0,9

Note : Cim. : ciment, Val. préd. : valeur prédite, Err. : erreur

4.3 Conclusion

En conclusion, il a été démontré, dans ce chapitre, qu'une modélisation basée sur les techniques de surfaces réponses constitue une très bonne base pour la prédiction de l'UCS du remblai, de son *slump*, de son pourcentage de solide et du coût de la quantité de ciment utilisée. Les valeurs très élevées des coefficients de corrélation R^2 (0,97-0,99) prouvent la validité des modèles développés et des paramètres d'entrées (% Ciment, E/C, % Fine, Dr.) des modèles, alors que les faibles erreurs de prédiction démontrent la capacité des équations développées à bien prédire les différentes propriétés des remblais. Les résultats de cette modélisation sont en parfaite concordance avec les résultats des études expérimentales effectuées dans le cadre de ce travail ou par divers auteurs (Landriault, 1995; Archibald *et al.*, 1998; Hassani et Archibald, 1998; Ouellet *et al.*, 1998; Bernier *et al.*, 1999; Benzaazoua *et al.*, 2002; Fall *et al.*, 2004; etc.). Étant donné que le remblai fabriqué dans l'usine doit satisfaire non seulement aux critères de sécurité (résistance mécanique satisfaisante), mais aussi techniques (*slump* compris entre 15 et 25 cm) et économiques (rentabilité), une optimisation des mélanges des remblais est nécessaire. Celle-ci est l'objet du paragraphe suivant.

5. OPTIMISATION DES RECETTES DE REMBLAIS EN PATE

Pour développer des recettes optimales pour les remblais en pâte, le principe d'optimisation multi-critère a été utilisé. Cette technique est largement expliquée dans les travaux de Derringer et Suich (1980). La fonction mathématique appliquée pour optimiser les mélanges de remblai est la fonction de désirabilité développée par Harrington (1965). Cette fonction de désirabilité permet de transformer chaque réponse des modèles (UCS, *Slump*, Coût, %Solid) en variables adimensionnelles appelées indice de désirabilité d_i. Cet indice est compris dans l'intervalle [0,1]. Par exemple, pour la réponse *slump*, la valeur minimale tolérée est un *slump* de 15 cm (Landriault *et al.*, 1997), qui aura un indice de désirabilité égale à 0. Toutes les valeurs de *slump* inférieures à 15 cm auront un indice de désirabilité nul. Le même principe est aussi appliqué pour les valeurs de *slump* égales ou supérieures à 25 cm. Par contre, la valeur idéale de *slump* qu'on devrait atteindre est égale à 18 cm; dans ce cas, elle aura un indice de désirabilité égal à 1. Un indice de désirabilité élevé, pour une réponse donnée, signifie que cette dernière contribue d'une manière très significative à la recette optimale des remblais en pâte. La multiplication de tous les indices de désirabilité permet de calculer la désirabilité globale (D). D est évidemment compris entre [0,1].

Ainsi, pour optimiser les propriétés des remblais en pâte, les contraintes suivantes ont été imposées aux réponses (UCS, *Slump*, Coût) des modèles :

- 700 kPa < UCS 28 jours < 1000 kPa;
- 15 cm < *Slump* < 25 cm;
- Coût : % ciment < 6 %.

Ces contraintes sont largement utilisées par plusieurs mines du Québec. Toutefois, il est important de noter que les contraintes reliées à la résistance mécanique peuvent largement varier d'une mine à l'autre en fonction des dimensions ou des caractéristiques des chantiers miniers.

La *figure 13* montre les principaux résultats de l'optimisation. Elle montre que le mélange optimal, permettant d'avoir une résistance suffisante du remblai et d'assurer la faisabilité de ce dernier (*slump* adéquat) de même que sa rentabilité, est caractérisé par les paramètres suivants :

- 3,8 % de ciment CP10/*Slag*;
- E/C = 7;
- % Fine = 50 ;
- Dr =3,46 g/cm³.

La désirabilité globale (D) de ce mélange a une valeur de 0,7. Son coût moyen serait de 3,50 $/t. La résistance moyenne à 28 jours serait de l'ordre de 1 000 kPa. Ce résultat est en concordance avec les valeurs expérimentales (*tableau 3*; Benzaazoua et al., 2003). D'autres mélanges (*figure 12*) présentent des désirabilités globales supérieures à zéro, c'est-à-dire qu'ils remplissent les critères de performance cités ci-dessus.

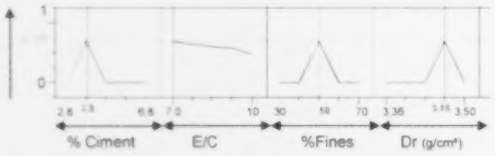


Figure 13 : Désirabilité globale du remblai en pâte non-sulfaté

6. OUTIL D'AIDE A LA FABRICATION DES REMBLAIS MINIERS EN PATE CIMENTES

Les équations développées pour prédire les performances mécaniques (UCS), techniques (*slump*, *% solid*) et économiques (coût de la quantité de ciment utilisée) des remblais en pâte ont été programmés avec *Visual Basic*. Ceci a conduit au développement d'un outil expert préliminaire (sous forme de progiciel) d'aide à l'optimisation des recettes de remblai en pâte. Ce progiciel pourra aider les ingénieurs miniers à préparer des remblais en pâte résistants, techniquement faisables et rentables.

L'outil expert (préliminaire dans son état actuel; le développement de l'outil se poursuit) est conçu pour être d'une utilisation très simple et facile. En effet, l'opérateur minier est guidé par l'outil. La *figure 14* montre la page principale d'entrée des données de l'outil expert développé pour la prédiction de la performance mécanique des remblais et l'optimisation de leurs recettes. L'opérateur minier ou l'utilisateur de cet outil doit introduire les principales caractéristiques de son remblai (le type et la quantité de ciment à utiliser, la teneur en sulfate de l'eau de gâchage, la granulométrie du résidu, la densité ou le pourcentage de soufre du résidu et le rapport E/C ou le pourcentage de solide visé). Ainsi, selon les caractéristiques du mélange, un des modèles développés dans le cadre de cette recherche sera automatiquement activé pour prédire la résistance du mélange remblai visé. L'outil permettra aussi à l'opérateur de visionner les performances d'une large gamme de mélanges autres que celui introduit par l'opérateur (*figure 15*).

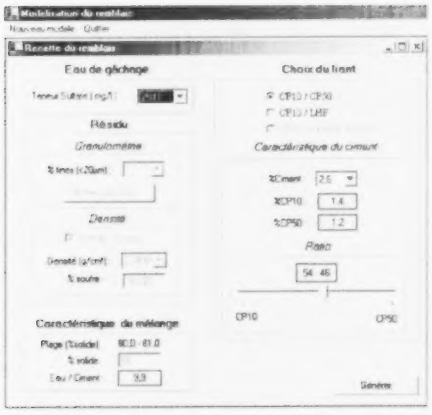


Figure 14 : Page principale d'entrée des données de l'outil expert développé

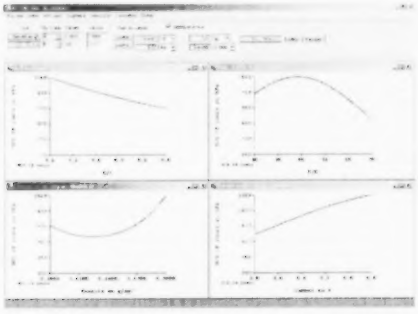


Figure 15 : Exemple de courbes de prédiction de l'UCS pouvant être livrées par l'outil expert

7. CONCLUSION

Dans ce travail, une étude pluridisciplinaire, basée sur des tests expérimentaux de laboratoire et sur la modélisation, a été effectuée afin d'arriver à une meilleure connaissance des propriétés des remblais en pâte et de développer un outil expert d'aide à la fabrication des recettes de remblais en pâte. Les études expérimentales effectuées ont permis d'avoir une bonne connaissance des principaux facteurs affectant la qualité des remblais en pâte et de définir les bornes des modèles développés. Une méthode et des modèles mathématiques permettant de prédire, avec une bonne précision, les performances mécaniques (UCS), techniques (*slump*, pourcentage de solide) et économiques (coût de la quantité de liant utilisée) du remblai en pâte ont été développés. Les résultats de vérification expérimentale des modèles développés ont confirmé la fiabilité des résultats de la modélisation. La simulation des réponses des modèles, en fonction des différentes variables, a permis de mettre en évidence l'effet de la proportion en ciment, de la granulométrie, du rapport E/C et de la densité sur les propriétés du remblai. L'effet de l'interaction de ces paramètres sur la performance du remblai a aussi été montré. Les résultats de cette modélisation sont en parfaite concordance avec les résultats des études expérimentales effectuées dans

le cadre de ce travail ou par divers auteurs (Landriault, 1995; Hassani et Archibald, 1998; Bernier *et al.*, 1999; Ouellet *et al.*, 1998; Benzaazoua *et al.*, 2000; Belem *et al.*, 2001; Fall *et al.*, 2003a; Ouellet *et al.*, 2003; Fall *et al.*, 2004; etc.). La programmation des équations développées dans la modélisation a permis de développer un progiciel préliminaire d'aide à la préparation des recettes de remblai en pâte.

À la lumière des résultats présentés dans ce rapport synthèse, nous pouvons affirmer que les objectifs de cette étude sont largement atteints. Ces résultats constituent une contribution significative dans la recherche sur la prédiction de la performance des remblais miniers en pâte et sur l'optimisation des recettes de mélange de remblai en pâte. L'outil expert proposé (qui est encore en son état préliminaire) reste pratique, simple et flexible. Le développement et l'amélioration de la qualité de cet outil continuent.

Cependant, bien que cette étude représente une contribution significative à une meilleure maîtrise de la technologie des remblais en pâte, elle comporte néanmoins des limites. Par exemple, le domaine de validité des modèles développés ne couvre pas tous les types de résidus, de ciment et d'eaux de gâchage utilisés par l'industrie minière canadienne. Donc, le progiciel développé ne pourrait être appliqué que dans le domaine de validité (encore restreint) des modèles développés. Par conséquent, des études supplémentaires sont nécessaires pour élargir le domaine de validité de l'outil expert développé.

8. RÉFÉRENCES

ARCHIBALD J. F., CHEW J. L., LAUSCH P. (1998). Use of Ground Waste Glass and Normal Portland Cement Mixtures for Improving Slurry and Paste Backfill Support Performance. 100th Annual General Meeting of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, Quebec, May, 1997; (CD-ROM publication)

AMARATUNGA L.M., YASCHYSHYN D.N. (1997). Development of a high modulus paste fill using fine gold mill tailings. Journal Geotech. and Geol. Eng., vol. 15, p. 205-209.

BELEM T., BENZAAZOUA M., BUSSIÈRE B. (2000). Mechanical behaviour of cemented paste backfill. Proc. of 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal. Octobre 2000: 373-380.

BELEM T., BUSSIÈRE B., BENZAAZOUA M. (2001). The Effect of microstructural evolution on the physical properties of paste backfill. Proc. of Tailings and Mine Waste'01. Janvier 2001: 365-374.

BENZAAZOUA M., OUELLET J., SERVANT S., NEWMAN P., VERBURG R. (1999). Cementitious backfill with high sulfur content: physical, chemical and mineralogical characterization. Cem. and Concr. Res., 29 : 719 – 725.

BENZAAZOUA M., BELEM T., JOLETTE D. (2000). Investigation de la stabilité chimique et son impact sur la résistance mécanique des remblais cimentés. Rapport IRSST, IRSST ed., R-260: 158p + Annexes.

BENZAAZOUA M., BELEM T., BUSSIÈRE B. (2002). Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill. Cement and Concrete Research. 32-7: 1133 – 1144.

BENZAAZOUA M, FALL M, OUELLET S. (2003). Étude pluridisciplinaire visant à mettre au point un outil expert pour la prédiction du comportement des remblais en pâte. Rapport final projet IRSST # 099-085, 187 p.

BENZAAZOUA M., FALL M., BELEM T. (2004). A Contribution to understanding the hardening process of cemented paste backfill. International Journal: Minerals engineering vol. 17/2, p.141-152.

BERNIER R.L., LI M.G., MOERMAN A. (1999). Effects of tailings and binder geochemistry on the physical strength of paste backfill. Proc. of Sudburry'99, Mining and the environment II. Goldsack, Belzile, Yearwood and Hall Eds., (3) : 1113-1122.

BOX G.E.P., WILSON K.B. (1951). On the experimental attainment of optimum conditions". J. Roy. Statist. Soc., B13, 1 (1951).

BOX G.E.P., DRAPPER N.R. (1987). Empirical Model-Building and Responses Surfaces, John Wiley & Sons, Inc., New York 1987.

BRACKEBUSCH F.W. (1994). Basics of Paste backfill systems. Mining engineering journal, 46 (10), October, 1175-1178.

DERRINGER G., SUICH R. (1980). "Simultaneaous Optimization of Several responses variables". Journal of quality technology 12, pp.214-219.

ELBERLING B., NICHOLSON R.V., REARDON, E.J., TIBBLE, P. (1994). Evaluation of sulphide oxidation rates: laboratory study comparing oxygen fluxes and rates of oxidation product release. Canadian Geotechnical Journal, 31: 375-383.

ELBERLING B., NICHOLSON R. V. (1996). Field determination of sulfide oxidation rates in mine tailings. Water Resources Research, 32 : 1773-1784.

FALL M., BENZAAZOUA M. (2003a). A Model for Predicting the Performance of Underground Paste Backfill. Proceedings of 18th Intern Conference on Solid Waste Technology and Management, 23 -26 Mars, Philadelphia USA. Zandi, I, Mersky, R. Shich W. and The Journal of Solid Waste Technology and Management (ed). p.969-980.

FALL M, BENZAAZOUA M. (2003b). Modeling the effect of sulphate on strength development of paste backfill and binder mixture optimization. Journal of Cement and Concrete Research (in press).

FALL M., BENZAAZOUA M. (2003c). Modeling and Simulation of Paste Backfill Performance Properties. Proceedings of 56th Canadian Geotechnical Conference; September 28 to October 1, 2003 in Winnipeg, Manitoba, Canada, pp. 161-168.

FALL M, BENZAAZOUA M. (2003d). Advances in Predicting Performance Properties and Cost of Paste Backfill. Proceedings of International Conference of Tailings & Mine Waste '03, October 12-15, 2003, Colorado, USA. Ed. Balkema, pp.73-85.

FALL M, BENZAAZOUA M., OUELLET S. (2004a). Experimental characterisation of the influence of mill tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill. International Journal of Minerals Engineering.

FALL M, BENZAAZOUA M., OUELLET S. (2004b). Effect of tailings properties on paste backfill performance. 8th International Symposia on Mining with Backfill. In Beijing, China on September 19 to 21, 2004.

GRICE T (1998). Underground Mining with Backfill ; 2nd Annual Summit – Mine Tailings Disposal Systems, Brisbane, Nov. 24-25.

HARRINGTON E.C. Jr. (1965). The desirability function; Industrial Quality Control. 21 (10), 494-498.

HASSANI F., ARCHIBAL J. (1998). Mine Backfill, CD-Rom, Canadian Institute of Mine, Metallurgy and Petroleum.

KHURI A. I., CORNELL J.A. (1987). *R*esponses surfaces: Design and Analysis, Marcel Dekker, Inc.: New York, NY.

LANDRIAULT D. (1995). Paste backfill Mix design for Canadian Underground Hard Rock Mining. 97th Annual General Meeting of CIM. Rock Mechanics and Strata Control Session. Halifax, Nova Scotia, May 14-18, 1995, pp. 239-238.

LANDRIAULT D., VERBURG, R., CINCILLA, W., WELCH, D. (1997). Paste technology for underground backfill and surface tailings disposal application, Short course notes, Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Technical workshop – april 27, 1997, Vancouver, Britisch Columbia, Canada, 120p.

LEPPINEN J.O., SALONSAARI P., PALOSAARI V. (1997). Flotation in acid mine drainage control: beneficiation of concentrate. Can. Metall. Q. 36 (4), 225-230

McLAUGHLIN J., STUPARYK R., (1994). Evaluation of low sulphur rock tailings production at Inco's Clarabelle Mill. In: Turgut, Yalçin (Ed.), Conf. on Innovation in Mineral Processing; Sudbury, Canada. pp. 129-146.

MITCHELL R.J. (1989). Stability of cemented tailings backfill. Computer and physical modelling in geotechnical engineering. Balkema, Rotterdam, pp. 501-507.

MYERS R. H., MONTOMERY D.C. (1995). Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, New York: Wiley.

OUELLET J., BENZAAZOUA M., SERVANT, S. (1998). Mechanical, mineralogical and chemical characterization of a paste backfill. Proceedings of Tailings and Mine Waste 98, Colorado: 139-146.

OUELLET S., BUSSIÈRE B., BENZAAZOUA, M., AUBERTIN M., FALL M., BELEM T. (2003). Sulphide reactivity within cemented paste backfill: oxygen consumption test results. Proceedings of 56th Canadian Geotechnical Conference, September 28 to October 1, 2003 in Winnipeg, Manitoba, Canada, pp.176-183.

STUPARYK R.A., KIPKIE W.B., KERR A.N., BLOWES, D.W., (1995). Production and evaluation of low sulphur tailings at INCO's Clarabelle Mill. Proceedings of Sudbury '95 (Canada), Conference on Mining and the Environment Vol. 1, 159-169.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'IRSST (Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail) pour le financement des travaux de recherche présentés dans cet article. Ils remercient aussi tous les techniciens (en particulier Hugues Bordeleau) et chimistes du laboratoire URSTM pour l'exécution des travaux de laboratoire. Nos remerciements vont aussi à David Bouchard pour la programmation des équations développées dans la modélisation et, aussi, à Serge Ouellet pour sa participation à la conception du progiciel.